

往返式探空观测资料的质量控制及不确定性分析

王丹^{1,2} 王金成^{1,2} 田伟红^{1,2} 郭启云³

1 国家气象中心, 北京, 100081

2 中国气象局数值预报中心, 北京, 100081

3 中国气象局气象探测中心, 北京, 100081

摘要: 为了推动新型探测资料在数值预报模式中的应用, 本文进行了往返式探空资料同化应用前重要的基础性研究工作。基于国内首次往返式探空观测资料, 首先建立了面向业务化应用的往返式探空资料质量控制方案, 通过对比和分析质量控制前后观测样本的统计特征, 论证了质量控制方案的合理性, 质控后探测要素抽样分布更为合理, 要素间一致性得到提高。进而以数值天气预报高时间分辨率的模式预报场和同站址业务常规探空观测资料为参考, 分析质控后资料的不确定性, 结果表明往返探空探测精度达到了世界气象组织 WMO (World Meteorological Center) 规定的突破目标, 部分探测要素甚至实现了理想目标, 探测资料具有可用性。最后结合数值模式背景场探讨往返探空资料的可同化性, 研究表明往返探空的风场观测和夜间温度观测满足变分同化系统的高斯、无偏假定, 可直接同化; 气压、湿度和日间温度观测在资料同化前需要开展偏差订正工作, 从而更有效的发挥资料价值。本文的研究工作为今后往返探空资料在模式中的同化应用奠定了基础。

关键词: 往返探空; 质量控制; 资料不确定性; 同化潜力

Quality Control and Uncertainty Analysis of Return Radiosonde

Wang Dan^{1,2}, Wang Jincheng^{1,2}, Tian Weihong^{1,2}, and Guo Qiyun³

1 National Meteorological Center, Beijing 100081

2 Numerical Prediction Center of CMA, Beijing 100081

3 Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081

Abstract: Aiming at promoting the application of new-type sounding data in NWP (Numerical Weather Prediction) models, this paper presents a basic research work of return radiosonde data. Based on the firstly archived return radiosonde observation datasets in China, a quality control scheme for future operational implementation purpose is established. By comparing and analyzing the statistical characteristics of observation samples before and after the quality control, the rationality of the quality control method is demonstrated. After the quality control procedure, the sampling distribution of the detection variables is more reasonable, and the inner-consistency of variables is

资助项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1506205) 第五课题, 国家重点研发计划 (2017YFC1502102), 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201506003), 中国气象局数值预报中心青年基金 (NWPC-QNJJ-2019)

作者简介: 王丹, 女, 1987 年生, 主要从事观测资料质量控制和同化应用研究, E-mail: wangd@cma.gov.cn

通讯作者: 王金成, 主要从事资料同化研究, E-mail: wangjc@cma.gov.cn

收稿日期: 2019-08-19; 网络预出版日期:

also improved. An uncertainty analysis of return radiosonde data is then carried out by referring to the high resolution NWP model forecast field and the conventional sounding observation data of the same site. The results show that the precision of return radiosonde has reached the breakthrough target defined by WMO (World Meteorological Organization). Some detection variables have even achieved the ideal target. Finally, the assimilability of return radiosonde data is discussed based on the background field of NWP model. The results show that wind field observation at all time and night temperature observation satisfy the Gauss and unbiased assumption of the variational assimilation system, and can be assimilated directly. In order to playing a more effective role in data assimilation system, air pressure, humidity observations and daily temperature need to be corrected before data assimilation. The work in this paper lays a foundation for the future assimilation application of return radiosonde.

Key words: Return Radiosonde, Quality Control, Uncertainty of Data, Potential in assimilation

1 引言

作为综合气象观测系统的重要组成部分,探空观测能够提供完整的三维大气的温、压、湿、风等信息,是高空观测体系中最为可信的基准资料 (Faccani C et al. ,2009)。近年来,随着探测技术的不断进步,探空观测已不再局限于标准层和特性层探测,而转向更高时空分辨率的秒级探测。自 1991 年起,澳大利亚气象局、英国气象局、法国气象局和美国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 等对全国站点或部分站点开展时间分辨率小于 5 秒,垂直分辨率低于 50m 的秒级探空观测 (Hamilton K et al., 2013)。2011 年起,我国探空系统也全面进行更新换代,由 59 型探空系统逐步升级为 L 波段探空系统,它的采样时间间隔为 1.2s,垂直间隔约为 8m,能提供更为密集的大气垂直探测信息 (郝民等, 2014)。

高分辨率的秒级探空资料可以更好地反映大气层结的细致特征,有助于预报员进行更为精细的天气学分析,对于开展大气内部运动规律的科学问题探索也提供了更为优质的资料基础 (Allen S J et al. ,1995; Wang et al. ,2003; 卞建春等, 2004; 王丽吉等, 2018)。数值预报模式是探空资料应用的又一重要领域,随着数值预报模式向更高水平和垂直分辨率的精细化预报方向发展,秒级探空资料在高分辨率数值预报模式中的同化应用成为新的探索方向 (Ingleby B and D.Edwards,2015 ; Ingleby B et al., 2016)。研究表明在数值预报模式中同化秒级探空,并引入探空漂移信息,对改善数值模式初始场、提高模式预报技巧有重要作用 (姚爽等, 2015; Stephane and Sarrazin ,2013)。

秒级探空资料应用的一大挑战是确保资料的高质量。长期以来,常规探空的质量控制技术研究主要由欧美科研和业务机构推动,如 NECP (National Centers for Environmental Prediction) 借助模式背景场发展了综合质量控制算法 (Complex Quality Control, CQC) (Collins. ,2001); ECMWF 早期发展的 EMOS (ECMWF's Meteorological Operational System) 质量控制系统 (Norris B,1990) 以及后期开发的变分质量控制方法

58 (Variational Quality Control, VarQC)(Andersson E and Järvinen H,1999)。在国内,国家气象信息中心 Liao and
59 Wang (2014) 采用顺序质量控制思路设计了常规探空质量控制算法,重点优化了高空风切变检查方法;张
60 金龙等(2017)完成了常规探空质量控制系统的业务化集成与应用。上述常规探空质量控制方法虽然成熟,
61 但是由于秒级探空资料的时空连续性较高,资料特性与常规探空并不完全一致,在进行质量控制方法设计
62 时并不能完全复制常规探空,需要进行深入优化。

63 探空观测模式多年来无显著进展,由于受到人力和物力的限制,全球约 2/3 的探空仍采用每日定常两次
64 (00UTC 和 12UTC) 的传统观测为主 (Choi Y et al.,2015)。显然,目前的探测频次并不能满足中小尺度灾
65 害性天气系统的监测和预警需求。在国外,多采用火箭下投探空或者飞机下投探空进行加密观测,而我国
66 在汛期或重大天气过程中多启用时间加密观测模式(Longland et al.,1999; 张诚忠等,2009; 舒守娟等,2011;
67 李跃清等,2012)。火箭和飞机下投探空以及时间加密观测均存在消耗巨大的问题,难以维持日常业务,迫
68 切需要一种新的观测模式。中国气象局气象探测中心多年来一直致力于探空观测新模式的探索,在 Vaisala
69 RS41 秒探空系统的启发下,近期提出创新型的往返式探空观测技术。它对探空气球实行一次施放多段观测,
70 即上升段一长时间平漂段一下降段的观测,实现了探空观测的间接时空加密,探测的垂直廓线数量加倍,
71 同时能获取平流层大气高频次连续观测资料,大幅节约了观测成本,是对探空技术改进的有益尝试。

72 数值预报模式是新型探测资料的应用示范和反馈优化的“窗口”,新型探测资料在数值模式中得以同化
73 应用对于推动探测模式发展具有重要意义。然而,往返式探空观测资料尚处于试验阶段,技术相对还不够
74 成熟,在进行数值资料同化应用工作前需要明确几点科学问题:(1) 新型资料存在哪些观测质量问题,质
75 量控制方案该如何设计?(2) 新型资料的特点以及仪器探测性能是否满足世界气象组织 WMO (World
76 Meteorological Organization) 提出的气象气球技术的准确度要求?(3) 新型资料能否满足变分同化系统对
77 于观测性质的基本假设,是否具有同化应用前景?为了深入回答上述科学问题,本文基于 2018 年长江流域
78 中下游地区取得的为期 1 个月的往返探空野外观测数据,首先开展资料质量控制方法研究,并对质量控制
79 后资料进行评估、深入分析探测数据的不确定性,最后探讨资料的数值预报可同化性。本文的研究工作有
80 助加深对往返式探空资料的理解和应用,并为今后在数值模式中的同化应用建立基础、积累经验。

81 2 资料与观测实验概况

82 2018 年 6 月 10 日-7 月 10 日,中国气象局大气探测中心联合探空仪生产厂家进行了国内首次往返式探
83 空的野外观测试验。在长江流域中下游地区的湖南、湖北、安徽、江西 4 省选取 6 个探空站作为气球施放
84 点,对应 GPS (Global Positioning System) 接收机按照 1:3 的比例架设,构成由 20 台左右接收机组成的探空
85 信号地面接收网络(图 1a)。往返探空气球一日施放 2 次,与现有业务探空放球时间错开,时间间隔约 30Mins。
86 图 1b 是以安庆站 2018 年 6 月 11 日 12UTC 为例,往返探空气球施放一次的运行轨迹。往返式探空采用“套
87 球”技术,上升段观测与现有业务类似,气球运行 1.3h 后到达下平流层,“外球”自动爆破开始进行 5.4h

88 长时间平漂观测，后通过爆破“内球”完成下降段探空观测，下降段观测时间约为 1h。

89 往返探空观测资料的时间分辨率为 2s，试验期间 6 个观测站点的总放球次数为 363 次。表 1 给出了往
90 返探空观测资料的统计信息概况，从表可知：气球上升段探测成功率为 100%，平均观测时长为 1.43h，平
91 均球炸高度为 26835m。仪器研制的技术性能指标设计中要求气球平漂时间 $\geq 4h$ ，按此指标统计，现阶段各
92 个站点的平漂成功率约为 45%，平均观测时长为 5.37h。气球下投成功率分别为安庆站 94.9%、长沙站 85%、
93 赣州站 84.7%、南昌站 98.3%、武汉站 90.3%以及宜昌站 87.1%，下降段平均观测时长为 0.87h，气球终止高
94 度站间差异较大，其中安庆站、武汉站下投终止高度较为接近地面。

95 表 1 往返探空观测资料统计信息概况
96 Table 1 statistical information of return radiosonde

站点号	总探测次数	平漂成功率	上升段平均 观测时长	上升段平均 球炸高度	平漂段平均 观测时长	下降段平均 观测时长	下降段平均 终止高度
安庆	59	45.8%	1.51h	27060.1m	5.54h	1.01h	1813.4m
长沙	60	46.7%	1.43h	27433.2m	5.14h	0.75h	4135.2m
赣州	59	44.1%	1.34h	26006.9m	5.22h	0.77h	4554.9m
南昌	61	42.6%	1.48h	27315.1m	5.38h	0.91h	2596.9m
武汉	62	43.5%	1.46h	27050.3m	5.72h	0.91h	861.7m
宜昌	62	46.8%	1.38h	26144.6m	5.21h	0.88h	3563.5m

97
98
99 图 1 往返探空试验区（a）及观测轨迹示意图（b）

100 （图 a 中实心黑点代表往返探空气球施放站点、空心三角代表 GPS 接收机布设点）
101 Fig.1 Return radiosonde network distribution (a) and an example of observation trajectory (b)
102 (Black dots represent return radiosonde launch stations and triangles represent GPS receiver locations in Fig.1a)

103 3 质量控制方法设计及效果评估

104 3.1 质量控制算法设计

105 观测资料中通常包含有随机误差、过失误差和系统性误差，对于没有任何天气学意义的错误资料，在
106 资料应用前需要剔除（翟盘茂，1997；郭艳君等，2009）。针对常规探空已经发展了许多质量控制方法，如
107 极值检查、要素间一致性检查、逆温检查、空间一致性检查、风切变检查以及静力学检查等（Durre et al. ,2008；
108 廖捷等，2018）。往返探空的质量控制方法在借鉴常规探空的同时，需结合资料特性，针对性地补充检查步
109 骤。本文设计的质量控制算法流程如图 2 所示，总原则如下：1）上升段、平漂段、下降段探测资料特性不
110 同，因此采用分段质量控制策略，三段资料分别开展质量控制；2）每一个检查步骤只进行质量标识（正确
111 为 0，可疑为 1，错误为 2，未检查为 9）而不对数据进行任意剔除，目的在于保证每一个检查模块相对独
112 立、结果互不干扰。下面具体介绍质量控制策略：

113 图 2 往返探空质量控制流程图
114 Fig.2 Quality control flow of return radiosonde

a. 常规检查

常规检查主要包括以下几个步骤:

1) 极值检查是对温度、气压、高度、风速、湿度进行值域范围检查;

2) 逆温检查则计算相邻两层的温度差来判断是否有异常逆温存在, 其中相邻两层的时间采样为 2s (下同);

3) 超绝热递减率检查公式为:

$$DT_i = T_i \times \left(\frac{p_{i+1}}{p_i} \right)^{\frac{R_d}{C_p}} - T_{i+1} \quad (1)$$

其中 DT_i 表示第 i 层的超绝热温度差, T 为温度、 P 为气压, R_d 为干空气比气体常数 $287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (下同), C_p 为干空气等压比热容 $1004.64\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$, 超过极值判据则认为温度异常, 上升段检查中要求满足 $P_i > P_{i+1}$ 判别条件、下降段则相反, 平漂段气压不具有单调性, 因此不进行超绝热递减率检查;

4) 要素间一致性检查为风向、风速和露点、温度间一致性检查, 以下情况认为资料异常:

i) 风速缺测, 风向非缺测或者风速非缺测、风向缺测;

ii) 风向 = 0, 风速 $\neq 0$ 或者风向 $\neq 0$, 风速 = 0;

iii) 温度-露点 $< 0^\circ$ 或者温度-露点 $> 50^\circ$;

以上四步检查判据具体参考欧洲中期天气预报中心 EMOS 系统。

5) 风切变检查参考廖菲等 (2017), 该方案同时考虑风向和风速的影响, 计算公式为:

$$WS_i = \sqrt{V_{i+1}^2 + V_i^2 - 2V_{i+1}V_i \cos D} \quad (2)$$

其中 WS_i 代表第 i 层的风切变, V 为风速, D 为相邻两时间层的风向差。 WS 阈值设置如图 3 中绿色线所示。 WS 阈值采取后验统计方式得到: 先对 WS 样本采用双权重算法 (具体介绍见下文) 逐时间层做一致性检查来剔除离群资料, 然后计算每个时间层的标准差均值廓线 (图 3 中蓝线), 对均值廓线进行分段最小二乘拟合 (上升、下降段时间窗取 60s, 平漂段取 180s) 得到拟合廓线 (图 3 中红线), 最终取拟合廓线的 N 倍值 (上升、下降段 $N=5$, 平漂段 $N=7$) 作为 WS 的判据 (图 3 中绿线), 当 WS_i 大于判据, 则认为相邻两层风速、风向可疑。

图 3 往返探空上升段 (a)、平漂段 (b)、下降段 (c) 风切变阈值的垂直分布
(蓝色线为标准差均值廓线, 红色线为最小二乘法拟合廓线, 绿色线为 WS 判断阈值)

Fig.3 Vertical distribution of wind shear threshold in ascending stage (a), drifting stage (b) and descending stage(c) of return radiosonde
(Blue line represent mean profile of standard deviation, red line represent the least square fitting profile and green line represent wind shear threshold)

b. “僵值” 检查

僵值是指在探测过程中出现探测要素值恒定不变的异常情况 (刘雨佳等, 2014)。例如: 1) 当温度传感器飞升进入较冷空气中, 若传感器上粘附的降水没能及时排干, 冻结释放的潜热将使其升温至 0°C 附近,

产生虚假的“0℃等温层”现象 (WMO, 2014), 如武汉探空在 30Mins 以上温度出现僵值 (图 4a); 2) 国产探空湿度元件由于性能问题, 在对流层高层低温环境下易被冻结导致测湿元件瘫痪, 相对湿度降低至 2%以下, 并僵持不变, 而在对流层低层, 湿度元件从高饱和度到低饱和度转换过程中无法及时恢复也会出现湿度僵值 (孙丽和赵姝慧, 2018), 如长沙探空在探测低层和高层均出现异常偏干层 (图 4c); 3) 探空仪风速探测错误的原因一般为 GPS 定位错误, 造成风速测量值在一段时间内固定不变 (陈磊等, 2017), 如宜昌探空在 50Mins-60Mins 间水平风速固定不变 (图 4e)。针对探测僵值, 本文对单根垂直廓线进行滑动最小二乘拟合。参考现行 L 波段探空系统的整分钟处理策略以及实践中反复测试, 文中滑动时间窗定为 60s。计算每段时间窗内探测要素的拟合直线斜率 (图 4b、图 4d、图 4g), 如若斜率接近于零, 则表明出现僵值。对于湿度廓线, 认为 100hPa 高度以下僵值为探测错误、高层僵值则认为可疑。

图 4 僵值廓线的温度 (a)、湿度 (c)、纬向风 (e) 及对应拟合斜率 (b、d、f) 的垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of temperature (a), relative humidity(c), zonal wind (e) and corresponding fitting slope (b,d,f) in example of rigid profile

c. 离群资料检查

数据一致性检查是质量控制中的重要环节, 通常定义探测要素变化值超过统计样本 3-5 倍标准差的资料为离群值 (傅新姝和谈建国, 2017)。然而, 离群资料本身会对统计样本的平均值和标准差产生很大影响, 从而影响到离群资料的识别 (刘寅, 2014)。为了减小这种影响, 本文对单根垂直廓线中探测要素的时间变率信息进行双权重算法判别 (Zou and Zeng, 2006), 以纬向风 U 为例, 它的时间变率定义为: $DU = (U_{i+1} - U_i)/dt$, 其中 dt 取 2s。算法主要步骤如下:

1) 计算探测要素时间变化样本 X 的双权重平均值 $\bar{X}$ 和双权重标准差 BSTD:

$$\bar{X} = M + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (X_i - M)(1 - w_i^2)^2}{\sum_{i=1}^{n-1} (1 - w_i^2)^2} \quad (3)$$

$$BSTD(X) = \frac{[n \sum_{i=1}^{n-1} (X_i - M)^2 (1 - w_i^2)^4]^{0.5}}{|\sum_{i=1}^{n-1} (1 - w_i^2)(1 - 5w_i^2)|} \quad (4)$$

公式中 M 是样本的中位数, i 为探测层次, W_i 为权重函数, 定义为:

$$w_i = \frac{X_i - M}{7.5 \times MAD} \quad (5)$$

MAD 表示 $|X_i - M|$ 的中位数, 当 $|w_i| > 1$ 时, 取 $w_i = 1$;

2) 计算样本中每个资料的 Z-score 值:

$$Z_i = \frac{|X_i - \bar{X}|}{BSTD(X)} \quad (6)$$

3) 对每个 Z_i 值进行判断, 当 $Z_i \geq Z_{qc}$, 则认为相邻两层资料均异常, 其中 Z_{qc} 为设定阈值, 不同探测要素、不同时间层采用不同判据, 计算方法同垂直风切变 WS 阈值相同。

数据不一致性有以下三类典型情况: i) 探测廓线中出现单独野点群, 如图 5a 中赣州探空 2000s 附近有明显离群点; ii) 探测廓线存在大段数据的层间变化异常, 如图 5d 中宜昌探空 4400s 以上温度值变化尖锐、显然不符合大气运动规律; iii) 探测要素在低值、高值间来回大幅摆动, 如图 5g 中安庆探空 1000s

181 以下湿度值波动造成的条纹状离群带。以上三类情况中异常点对应的 Z-score 值均大于设定阈值 Z_{qc} (图 5c、
182 图 5f、图 5i 红线色), 从而都能被有效识别。

183

184 图 5 不一致性廓线的探测值 (左列)、对应时间变率信息 (中列) 及 Z-score 值 (右列) 的垂直分布
185 (图中蓝色×点代表可疑观测, 红色实线代表 Z-score 阈值)

186 Fig.5 Vertical distribution of observed value (left column), corresponding time-variance information (middle column) and Z-score
187 value (right column) in example of inconsistency profiles
188 (blue × represent suspicious observations ,red lines mean threshold of Z-score)
189

190 d. 单调性检查

191 对气压和高度变量进行趋势检查。在气球上升过程中, 若探测气压垂直递增/不变、探测高度递减/不
192 变, 则认为当前气压和高度观测可疑, 气球下降段判据则与上升段相反 (Loehrer et al. ,1996)。由于气球在
193 平漂过程中会上下浮动, 因此该检查模块对于平漂段观测不适用。

194 e. 气球升速检查

195 探空气球的上升速度影响到温度、湿度传感器的通风, 同时探空气球急速上升和下降会引起 GPS 定位
196 错误 (WMO, 2014)。因此, 需要对探空气球的升速进行检查。图 6 给出了上升段、平漂段以及下降段探
197 空升速的垂直分布。从图可知: 1) 上升段探空存在“下顿”现象, 可能是强下沉气流所致, 这种情况会破
198 坏上升段气压递减趋势, 对该探测层给予错误标志; 同理, 下降段探空中的“上浮”现象也认为是观测错
199 误; 2) 无论是上升段、平漂段、下降段升速观测中均存在离群点, 特别是上升段和平漂段, 大气的强水平
200 和垂直运动破坏气球净举力平衡是一个可能的原因, 对气球升速采用双权重算法进行一致性检查, 离群值
201 对应探测要素认为可疑。

202

203 图 6 探空气球上升速度的垂直分布
204 (a) 上升段, (b) 平漂段, (c) 下降段
205 (图中红色点代表错误观测, 蓝色点代表可疑观测)

206 Fig.6 Vertical distribution of lift speed in ascending stage (a), drifting stage (b) and
207 descending stage(c) of return radiosonde
208 (red dots represent error observation,blue dots represent suspicious observations)
209

210 f. 静力学检查

211 根据大气静力学公式可推导出压高公式, 从而可求解出反算气压:

212
$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = - \int_{z_1}^{z_2} \frac{g}{R_d \bar{T}_v} dz \quad (7)$$

213 式中, Z代表位势高度, P代表气压, R_d 为比气体常数, g为大气重力加速度 9.80665m/s^2 , $\bar{T}_v$ 代表层间平均
214 虚温。假设观测准确, 反算气压和观测气压应该相近, 若两者出现较大差异 (本文取 $\pm 50\text{hPa}$), 则认为该
215 层气压、温度、湿度和位势高度观测可疑, 结合查看温度、湿度和位势高度其他检查步骤的质量控制码,
216 可确定该层气压是否错误。该检查模块是气压离群值检查模块的有益补充, 可有效识别气压离群值检查中
217 的漏判资料, 例如: 图 7 中南昌探空在 3000s 以后变化趋势异常 (图 7a), 经过气压离群值判断虽然可以将

218 气压梯度异常值识别，但仍存在漏判（图 7b），增加静力学检查后，残留异常值被识别（图 7c）。

219

220 图 7 气压异常廓线的原始观测（a）、经过气压离群值检查后观测（b）及

221 增加静力学检查后观测（c）的垂直分布

222 （图中黑色代表气压观测值，红色代表反算气压值）

223 Fig.7 Vertical distribution of raw pressure observation (a), pressure observation after outlier check (b) and

224 pressure observation after hydrostatic check (c) in example of pressure abnormal profile

225 (black line represent raw pressure observation, red line represent inverse calculated pressure value)

226

227 g. 综合决策

228 遍历所有检查步骤中产生的质量控制码：若任意质量控制步骤中出现错误标记，则认为该资料错误；
229 对于无法确定为错误的可疑资料，如果有两种以上质量控制方法认为它可疑，则判定该资料为错误，否则，
230 该资料仍旧为可疑。

231 3.2 质量控制效果评估

232 为验证质量控制算法的有效性，参考 Houchi K et al（2014）采用的百分位法对质量控制前后的观测数
233 据集进行抽样检查。图 8 给出了质量控制前后探测要素的百分位廓线分布图。图中设定的百分位阈值依次
234 为 0%、10%、25%、50%、75%、90%和 100%。从图可知：U 风和 V 风的原始观测中 0%和 100%廓线中存
235 在个别极大风速值，明显超出合理的风速范围，质量控制算法能剔除这些异常值，质量控制后的风场分布
236 更为合理。对于温度观测而言，在 100%廓线中能看到明显的虚假“0℃”等温层，0%廓线在 90Mins 以下
237 存在多处温度变化异常，质量控制算法能识别这类不合理值，质量控制后的温度百分位廓线分布也更为合
238 理。气压观测中，原始观测在 90Mins 以下存在气压变化异常，质量控制算法修正了气压观测错误。位势高
239 度观测质量控制前后百分位廓线分布差异不大。湿度观测中，原始 0%廓线在 30Mins 以下存在 2%湿度僵值，
240 质量控制后湿度低层僵直被移除。总体而言，质量控制后的探测要素的抽样分布更为合理，说明本文的质
241 量控制算法是有效的。

242

243 图 8 往返探空质量控制前和质量控制后的温度、湿度、气压、水平风和位势高度探测

244 的不同百分位廓线分布图

245 （图中第一行和第三行是原始观测、第二行和第四行是质量控制后观测）

246 Fig.8 Percentile profiles of temperature, relative humidity, pressure, wind and geo-potential height of return radiosonde

247 (first line and third line represent raw data, second line and fourth line represent data after quality control)

248 质量控制前后数据的一致性也是极为重要的评价指标。图 9 给出了质量控制前后探测要素的时间变率
249 分布图。从图 9 可知：质量控制前，水平风（限于篇幅，以 U 风为例）、温度、气压、位势高度和湿度观测
250 均存在明显的时间变率异常值，表现为数据间不一致性较强；质量控制后，各个探测要素的时间变率异常
251 值被剔除，数据一致性显著提高。进一步量化计算可知：质量控制前后，水平风、温度、气压、位势高度

252 和湿度的时间变率标准差分别减小了 52.9%、5.9%、15.8%、0.6%和 22.8%（具体见表 2），数据离散度明显
253 减小。以上定量分析和定性分析都证明了本文的质量控制算法的有效性。

254
255 图 9 往返探空质量控制前和质量控制后的纬向风、温度、气压、位势高度和湿度探测的时间变率分布图
256 （图中左列是上升段观测、中间列是平漂段观测、右列是下降段观测；
257 黑色代表质量控制前，红色代表质量控制后）

258 Fig.9 Time-variance distribution of zonal wind, temperature, pressure, geo-potential height
259 and relative humidity of return radiosonde before(black line) and after quality control(red line)
260 (left column represent ascending stage, middle column represent drifting stage, right column represent descending stage)

261
262 表 2 往返探空观测资料质量控制前后的统计量特征
263 Table 2 Statistical characteristics of return radiosonde before and after quality control

	样本数	均值	标准差	资料剔除率
质控前 du	2560990	-0.001 m/s.s ⁻¹	0.52 m/s.s ⁻¹	3.74%
质控后 du	2465230	-0.001 m/s.s ⁻¹	0.25m/s.s ⁻¹	
质控前 dt	2560990	-0.008℃.s ⁻¹	0.17℃.s ⁻¹	4.20%
质控后 dt	2453340	-0.009℃.s ⁻¹	0.16℃.s ⁻¹	
质控前 dp	2560990	-0.103 hPa.s ⁻¹	0.38 hPa.s ⁻¹	4.16%
质控后 dp	2454410	-0.101 hPa.s ⁻¹	0.32 hPa.s ⁻¹	
质控前 dh	2560990	2.525 gpm.s ⁻¹	8.17 gpm.s ⁻¹	2.33%
质控后 dh	2501400	2.474 gpm.s ⁻¹	8.12 gpm.s ⁻¹	
质控前 drh	2560990	-0.007%.s ⁻¹	0.57%.s ⁻¹	3.19%
质控后 drh	2479280	-0.007%.s ⁻¹	0.44%.s ⁻¹	

264
265 **4 往返探空资料的不确定性分析**

266 评估新型探空仪器观测性能的最佳方式是进行探空仪比对试验，即多个探空仪同球施放对同一观测对
267 象进行探测从而确定仪器的观测误差（李柏和李伟，2011）。然而，同球比对试验实施成本较高，限于客观
268 条件限制，此次往返探空外场试验没有进行同球施放。同址常规业务探空仅能匹配往返探空上升段资料，
269 平漂段和下降段资料与常规探空时空错位、难以匹配，不能进行全时段比较。随着数值天气预报的精细化
270 发展，利用数值模式短期预报场对探空资料进行评估已经成为评价观测质量的重要手段，以 ECMWF 为首的
271 世界各大业务中心均已建立基于数值预报模式的资料监控平台（马颖等，2011；姚雯和马颖，2015）。因此，
272 本文主要采用中国气象局数值预报中心自主研发的 GRAPES（Global/Regional Assimilation and Prediction
273 System）四维变分同化系统（以下简称 GRAPES-4Dvar）来评估全时段往返探空的观测数据质量，并结合同
274 站址的常规探空进行往返探空上升段资料的评估，以辅助验证观测设备的合理性。文中探测要素的不确定
275 性评估指标主要参考 WMO 仪器与观测方法委员会（Commission for Instruments and Methods of Observations，

276 CIMO) 提出的测量标准 (WMO, 2014) 和中国气象局制定的常规高空气象探测规范 (中国气象局, 2010)。

277 四维变分是三维变分同化在时间维上的扩展, 能更准确的考虑观测时间, 从而更为精确地计算观测背
278 景差 (Observation Minus Background, 以下简称 OMB) (刘永柱等, 2019)。往返探空 OMB 计算具体如下:
279 首先进行 GRAPES-4Dvar 外循环高分辨率模式的初始化和数组空间分配; 然后以 FNL (Final Operational Global
280 Analysis) 资料作为模式初始场冷启动, 进行高分辨率全物理过程的前向模式积分, 积分时长为 6 小时; 前
281 向积分过程中每到观测时刻外循环模式读入对应时刻的观测, 随后计算出 OMB。GRAPES-4Dvar 的观测时间
282 槽为 30Mins, 本文将往返探空资料剖分为 30Mins 观测, 采取逐点同化方式 (考虑探空漂移信息) 代替廓线
283 同化来获得最精确的 OMB 计算。

284 图 10 给出了往返探空上升段、平漂段和下降段风场 OMB 的标准差和偏差的垂直分布。从图 10 可知:
285 水平风的偏差在各个阶段基本稳定在-0.5m/s-0.5m/s 之间, 表明测风没有很大的系统性偏差。将大气分为对
286 流层顶以上和对流层顶以下两部分, 分别统计风场标准差的平均值, 然后与 WMO 规定的风测量不确定性要
287 求进行比较 (计算结果见表 3)。根据误差分解原理 (李伟等, 2010; 王金成等, 2015), 假设观测样本和背
288 景样本足够且满足正态分布, 并且观测误差和背景误差无关, 可推导出:

289
$$\sigma_{OMB}^2 = \sigma_o^2 + \sigma_b^2 \quad (8)$$

290 其中 σ_{OMB} 表示 OMB 的标准差、 σ_o 表示观测误差标准差、 σ_b 表示背景误差标准差。从公式 (8) 可推理出:
291 $\sigma_o \leq \sigma_{OMB}$ 。据此理论, 分析表 3 结果可以得出: 往返探空水平风的 σ_{OMB} 范围在 2.42m/s-3.56m/s, 表明仪
292 器测量精度达到了 WMO 规定的突破目标 4m/s-6m/s、远优于边界目标 10m/s-16m/s。此外, 对流层顶以下
293 测风精度优于对流层顶以上, 下降段探空测风能达到上升段探空的测风精度, 这与 ECMWF 对于 Vaisala RS41
294 新型号探空测风的评估结论相一致 (Ingleby B, 2017)。

295

296 图 10 往返探空水平风测量相对于模式背景场的标准差和偏差的垂直分布
297 Fig.10 Vertical distribution of STD (standard deviations) and BIAS of return radiosonde wind observation
298 against GRAPES model background

299 分析往返探空各个探测阶段温度场的 OMB 的标准差和偏差的垂直分布 (图 11)。从结果可知: 受制于
300 温度传感器的滞后误差和太阳辐射等影响, 温度的探测精度总体表现为白天误差大于夜间误差, 特别在平
301 漂阶段, 温度传感器长时间暴露于太阳照射之下, 造成白天/夜间温度差异超过 4K。WMO 对于温度不确定
302 度的理想目标范围为 0.6k-1k, 突破目标为 1.8k-2.8k, 边界目标为 6k。对比往返探空的误差统计值 (表 3)
303 可以得出: 往返探空各个阶段的夜间温度观测均达到了 WMO 规定的温度突破目标, 其中上升段和下降段探
304 空中对流层以下温度探测精度较高, 误差低于 1k, 达到了理想目标; 白天的温度观测除了平漂段探测外,
305 误差都小于 2.8k, 达到了突破目标; 平漂段探空的白天温度观测接近边界目标 6k。此外, 从平均偏差特征

来看，下降段白天的温度观测正偏差较上升段更为明显，其中对流层中低层偏差在 1k 以内，高层 150hPa 左右达到 2k，20hPa 以上超过 3k，这主要是因为下降段的日间探测对应于午后时段，而午后太阳辐射影响更为显著。

图 11 往返探空温度测量相对于模式背景场的标准差和偏差的垂直分布
Fig.11 Vertical distribution of STD and BIAS of return radiosonde temperature observation
against GRAPES model background

图 12 为往返探空湿度观测 OMB 的标准差和偏差的垂直分布，因为对流层顶以上以及平漂段中湿度一直处于僵直状态，认为探测湿度可疑，因此只统计上升段和下降段对流层顶以下的湿度场观测信息。从图可知：上升段和下降段的湿度场分布具有很强的一致性，表现为 500hPa 以下相对于背景场有 5%的正偏差，500hPa 以上到对流层顶附近相对于背景场异常偏干。造成湿度探测偏干的可能原因在于湿度传感器在低温、低压情况下与大气之间的水分子交换困难，同时湿度传感器在低温环境下易冻结造成响应变慢（WMO，2014）。WMO 规定湿度探测在对流层以下的突破目标为 16%，往返探空上升段湿度探测达到突破目标、下降段观测接近突破目标，两者都远高于边界目标 40%，但是距离 2%-4%的理想目标还有不小的差距（见表 3）。

图 12 往返探空湿度测量相对于模式背景场的标准差和偏差的垂直分布
Fig.12 Vertical distribution of STD and BIAS of return radiosonde relative humidity observation
against GRAPES model background

在气压探测方面（图 13），往返探空各个阶段探测的 OMB 标准差均小于 1hPa，气压观测误差达到了 WMO 规定的理想目标 1hPa，表明往返探空配备的气压探测计具有较高的准确度，但是存在系统性负偏差，这可能与压力传感器选用材质的抗热冲击性有关。

图 13 往返探空气压测量相对于模式背景场的标准差和偏差的垂直分布
Fig.13 Vertical distribution of STD and BIAS of return radiosonde pressure observation
against GRAPES model background

表 3 往返探空观测相对于模式背景场的标准差统计特征
Table 3 standard deviations of return radiosonde observation against GRAPES model background

探测阶段	垂直层次	OMB 标准差均值				
		U 场	V 场	T 场（日/夜）	RH 场	P 场
上升段	对流层顶以下	2.42m/s	2.84m/s	1.03k/0.92k	15.58%	0.63hPa
上升段	对流层顶以上	3.01m/s	3.56m/s	1.87k/1.47k	—	0.54hPa
平漂段	对流层顶以上	3.13m/s	3.30m/s	6.03k/1.54k	—	0.49hPa
下降段	对流层顶以下	2.50m/s	2.74m/s	1.16k/0.80k	16.48%	0.75hPa
下降段	对流层顶以上	2.81m/s	3.23m/s	2.33k/1.45k	—	0.61hPa

335 为了进一步佐证往返探空观测资料的质量，表 4 给出了同站址的常规业务探空和对应往返探空上升段
336 数据的偏差和标准差的计算结果。总体来看，与常规业务探空相比，往返探空上升段的观测质量基本满足
337 WMO 的突破目标要求，气压观测更是达到了理想目标，这与以数值预报作为参考场的计算结论是一致的。
338 其中，风场差异相对较大，一方面可能由于两探空采用的定位方式不同（GPS 定位和雷达定位），另一方面
339 两探空的施放时间并不严格意义上同步，所以造成上述差异。

340 表 4 往返探空上升段观测相对于同站址业务探空的标准差和偏差
341 Table 4 Standard deviations and bias of return radiosonde observation against
342 operational radiosonde at the same site

探测要素	垂直层次	标准差	偏差
U 场	对流层顶以下	3.24m/s	-0.44m/s
	对流层顶以上	3.14m/s	0.50m/s
V 场	对流层顶以下	3.59m/s	0.30m/s
	对流层顶以上	3.37m/s	-0.96m/s
T 场	对流层顶以下	1.38k	0.42k
	对流层顶以上	2.73k	0.12k
P 场	对流层顶以下	0.90hPa	-0.76hPa
	对流层顶以上	0.64hPa	-1.82hPa
RH 场	对流层顶以下	16.28%	5.51%

343
344 综合上述，往返探空的水平风、温度、湿度和气压测量的不确定度基本达到了 WMO 规定的突破目标，
345 远优于边界目标，部分观测要素甚至实现了理想目标。从探测层面上，认为往返探空资料可信，具有可用
346 性。从数值同化层面上，往返探空是否具有可同化性？变分同化系统要求观测背景差 OMB 尽量满足无偏和
347 高斯分布，图 14 给出了往返探空探测要素的 OMB 的概率分布图。从图可知：往返探空各个阶段风场观测
348 基本满足正态无偏，符合变分同化系统对于观测的基本假定。温度传感器由于太阳辐射影响，日间存在正
349 系统偏差，特别是平漂阶段，系统偏差达到 8.73k；夜间系统性偏差较小，能满足同化要求。气压测量和湿
350 度测量均为系统性负偏差，偏差均值分别为-1.56hPa 和-10.4%。总的来说，往返探空风场观测和夜间温度观
351 测可直接同化，湿度等系统性偏差较大的观测要素在同化前最好进行偏差订正来提高资料的应用效果。

352
353 图 14 往返探空与模式背景场差值的概率密度分布
354 Fig.14 Probability density distribution (PDF) of differences between return radiosonde
355 and GRAPES model background
356
357
358

359 5 总结和讨论

360 基于 2018 年国内首次往返式探空野外观测试验取得的夏季 1 个月的观测资料, 本文首先建立了面向业
361 务化应用的往返式探空质量控制方案, 并对质量控制方案的合理性进行论证; 进而基于我国自主研发的
362 GRAPES-4Dvar 同化系统开展质控后全观测时段资料的不确定性分析, 同时结合常规业务探空来进一步佐证
363 观测资料质量是否满足 WMO 提出的探测准确度要求; 最后分析了观测资料的偏差特征来探讨数值预报的可
364 同化性。主要结论如下:

365 (1) 面向业务化应用的往返探空质量控制算法针对上升段、平漂段、下降段探测资料的不同特性, 采
366 取不同的质量控制参数(如风切变阈值、z-score 阈值等)来分阶段质控资料。每阶段质控包含了近 10 种检
367 查步骤, 采用综合决策算法对观测要素给予最终质量标记。对质控前后的观测资料集进行百分位抽样检查
368 和一致性指标统计, 无论从定性分析还是定量化角度都证明了本文的质量控制算法是合理有效的。

369 (2) 利用数值天气预报高时间分辨率的模式预报场和同站址常规业务探空对往返探空质控后的数据进
370 行精细化评估, 结果表明往返探空资料是可信、可用的。它的测风不存在系统性偏差, 不确定度达到了 WMO
371 规定的突破目标, 远优于边界目标; 温度观测表现为昼夜差异明显, 夜间温度观测系统性偏差小, 不确定
372 度满足 WMO 规定的突破目标, 但是日间观测系统性偏差大, 特别是平漂段观测, 受太阳辐射影响极为明显,
373 后期使用中需对日间温度加以辐射偏差订正; 气压观测准确度较高, 不确定度小于 1hPa, 达到了 WMO 的
374 理想目标; 在湿度探测方面, 湿度测量的不确定度接近 WMO 规定的突破目标, 但是负偏差明显, 未来需要
375 提高我国探空湿度传感器的探测性能。

376 (3) 变分资料同化要求观测基本无偏, 从这一假定出发可以得到: 往返探空的风场观测和夜间温度观
377 测系统性偏差接近于零, 满足变分同化系统对于观测性质的高斯、无偏假定, 可直接用于同化系统。日间
378 温度、气压和湿度观测相较于数值模式背景场系统性偏差明显, 在资料同化前需要进一步开展偏差订正工
379 作, 从而更有效的发挥资料价值。

380 本文的研究工作为以后开展往返式探空在数值模式中的同化应用积累了经验, 未来的研究工作包括:

381 (1) 质量控制算法进一步优化和普适性验证。秒级探空测风数据存在“钟摆效应”, 导致观测数据中
382 实际包含了噪音, 需要开展频谱分析技术对风场进行滤波来提高数据的观测代表性。其次, 本文质量控制
383 算法中采用的阈值参数是基于观测样本后验统计得到的, 具有的一定的经验性, 需要收集更多的往返观测
384 外场数据进行质量控制算法效果的普适性检验。此外, 未来需充分考虑探测变量间的物理关系来联合判断
385 数据质量, 最终形成更为完善的综合质量控制方案。

386 (2) 开展与独立观测资料的交叉比对研究。需要积累更多的往返探空观测资料来完成与其他类型观测
387 资料(如掩星资料、飞机报资料等)的样本匹配和交叉比对工作, 从而确定往返探空的观测误差, 为数值
388 模式变分同化系统提供参考值。

389 **致谢:** 中国气象科学研究院阮征研究员、国家气象中心陶士伟正研级高工以及国家气象信息中心远芳高级
390 工程师对本文给予了宝贵建议和帮助, 谨此致谢!

391

392 **参考文献:**

- 393 Faccani C, Rabier F, Fourrié N.2009.The impact of the AMMA radiosonde data on the
394 French global assimilation and forecast system [J].Weather & Forecasting, 24(5):1268-1286.
- 395 Hamilton K,Vincent R.2013. High-resolution radiosonde data offer new prospects for research [J].
396 Eos Transactions American Geophysical Union, 76(49):497-506.
- 397 郝民,田伟红,龚建东.2014.L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究[J].
398 气象,40(2):158-165. Hao Min,Tian Weihong,Gong Jiandong.2014.Study of L Band Second Level
399 Radiosonde Data Applied in GRAPES Assimilation System [J].Meteorological Monthly (in
400 Chinese), 40(2):158-165.
- 401 Allen S J, Vincent R A. 1995.Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations [J].
402 Journal of Geophysical Research Atmospheres, 100(D1):1327-1350.
- 403 Wang L, Geller M A.2003.Morphology of gravity-wave energy as observed from 4 years (1998–2001) of high
404 vertical resolution U.S. radiosonde data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 108(D16): ACL
405 1-1-ACL 1-12.
- 406 卞建春,陈洪滨,吕达仁.2004.用垂直高分辨率探空资料分析北京上空下平流层重力波的统计特性[J].中国科学:
407 地球科学,34(8):748-756.Jianchun Bian, Hongbin Chen, Daren Lv. 2004.Analysis of the statistical characteristics
408 of the gravity wave in the lower stratosphere over Beijing by using the vertical high resolution sounding
409 data[J].Science in China Series D-Earth Sciences(in Chinese),34(8):748-756.
- 410 王丽吉,杨程.2018.热带平流层多尺度波动分离方案的研究:多站点高分辨率无线电探空联合分析[J].气象学
411 报,76(1):62-77. Wang Liji, Yang Cheng. 2018. Separation of planetary and gravity waves in the tropical
412 stratosphere with multi-station radiosonde data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 76(1): 62-77.
- 413 Ingleby B, D. Edwards.2015: Changes to radiosonde reports and their processing for numerical weather prediction.
414 Atmos. Sci. Lett., 16(1): 44–49.
- 415 Ingleby B,Pauley P,Kats A,et al.2016. Progress toward high-resolution, real-time radiosonde reports [J]. Bulletin of
416 the American Meteorological Society, 97(11): 2149-2161.
- 417 姚爽,陈敏,王建捷,等,2015.L 波段分钟数据在 WRF 模式中的变分同化应用试验[J].

418 气象,41(6):695-706. Yao Shuang,Chen Min,Wang Jianjie,et al,2015.Variational Assimilation Experiment of L Band
419 Minute Level Sounding Data with WRF Model[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41(6):695-706.
420 Laroche Stéphane, Sarrazin Réal.2013.Impact of Radiosonde Balloon Drift on Numerical Weather Prediction and
421 Verification [J]. Weather and Forecasting, 28(3):772-782.
422 Collins William G.2001.The Operational Complex Quality Control of Radiosonde Heights and Temperatures at the
423 National Centers for Environmental Prediction. Part I: Description of the Method [J].Journal of Applied
424 Meteorology, 40(2):137-151.
425 Norris B.1990. Preprocessing and general data checking and validation[R]. Meteorological Bulletin of the
426 ECMWF.M1.4-3., European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, U.K.
427 Anderson E , Järvinen H.1999.Variational quality control [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological
428 Society, 125(554):697-722.
429 Liao Jie,Wang Bin,Li Qingxiang. 2014. A New Method for Quality Control of Chinese Radiosonde Wind
430 Observations [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 31(6):1293-1304.
431 张金龙,阮新.2017.气象探空资料质量控制系统的实现[J]. 信息技术与信息化,11:60-62.
432 Jinlong Zhang,Xin Ruan.2017. Realization of quality control system for meteorological Radiosonde data[J].
433 Information Technology and Informatization,11:60-62.
434 Yonghan Choi,Jong-Chul Ha,Gyu-Ho Lim.2015.Investigation of Effects of Considering Balloon Drift Information
435 on Radiosonde Data Assimilation Using the Four Dimensional Variational Method[J]. Weather & Forecasting,
436 30(3):809-826.
437 Langland R H,Toth Z,Gelaro R.1999.The North Pacific Experiment (NORPEX-98):Targeted Observations for
438 Improved North American Weather Forecasts[J].Bulletin of the American Meteorological
439 Society,80(7):1363-1384.
440 张诚忠,万齐林,丁伟钰,等.2012.下投探空资料在台风莫拉克路径预报的应用试验[J]. 气象学报, 70(1):30-38.
441 Zhang Chengzhong, Wan Qilin, Ding Weiyu,et al. 2012. An experiment in application of the dropsonde data to
442 forecasting the track of Typhoon Morakot[J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(1): 30-38.
443 舒守娟,王元,宋金杰.2011. 西北太平洋台风“海棠”结构的 GPS 下投式探空仪观测分析[J].气象学
444 报,69(6):933-944. Shu Shoujuan,Wang Yuan, Song Jinjie.2011.Observational analysis of the structure of Typhoon
445 Haitang(0505) over the western North Pacific by using the GPS Dropsonde data. Acta Meteorologica Sinica,
446 69(6):933-944.
447 李跃清,赵兴炳,张利红,等,2012. 2012 年夏季西南涡加密观测科学试验[J].高原山地气象

研究,32(4):1-8. Li Yueqing, Zhao Xingbing, Zhang Lihong, et al, 2012. Intensive observation scientific experiment of the southwest vortex in the summer of 2012 (in Chinese) [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 32(4):1-8.

翟盘茂.1997.中国历史探空资料中的一些过失误差及偏差问题[J].气象学报, 55(5):563-572.

Zhai Panmao.1997.Some Gross Errors and Biases in China's historical radiosonde data. Acta Meteorologica Sinica,55(5):563-572.

郭艳君,李庆祥,丁一汇.2009.探空资料中的人为误差对中国温度长期变化趋势的影响[J].大气科学,33(6):1309-1318. Guo Yanjun, Li Qingxiang, Ding Yihui.2009.The Effect of Artificial Bias on Free Air Temperature Trend Derived from Historical Radiosonde Data in China[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),33(6):1309-1318.

Durre I, Vose R S, Wuertz D B.2008. Robust Automated Quality Assurance of Radiosonde Temperatures[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47(8):2081-2095.

廖捷,周自江.2018.全球常规气象观测资料质量控制研究进展与展望[J].气象科技进展,8(1):56-63.

Jie Liao, Zijiang Zhou.2018. Quality Control of the Global Conventional Meteorological Observations: Progresses and Prospects [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 8(1):56-63.

廖菲,邓华,李旭.2017.基于风廓线雷达的广东登陆台风边界层高度特征研究[J].大气科学,41(5):949-959.

Liao Fei, Deng Hua, Li Xu.2017.A Study on Boundary Layer Height Characteristics of Landing Typhoons by Wind Profilers in Guangdong Province[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),41(5):949-959.

刘雨佳,陈洪滨,金德镇,等.2014.加密自动气象站雨量计资料的质量控制及其相关关系的研究[J].大气科学,38(1):159-170. Liu Yujia, Chen Hongbin, Jin Dezhen, et al.2014.Quality Control and Representativeness of Automatic Weather Station Rain Gauge Data[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),38(1):159-170.

WMO.2014.Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO No. 8)[R].available from <https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/IMOP-home.html>[2019-12-03]

中国气象局.2010.常规高空气象观测业务规范[M].北京:气象出版社.China Meteorological Administration.2010.Standard for operational upper air observation [M]. Beijing: China Meteorological Press.

孙丽,赵姝慧.2018.探空仪湿度测量误差研究现状及其对云识别的影响[J].地球科学进展, 33(1):85-92.

Li Sun, Shuhui Zhao.2018. Research on Humidity Measurement Error of Radiosonde and Its Influence on Cloud Recognition[J].Advances in earth science,33(1):85-92.

477 陈磊,卞建春,刘毅,等.2017.可业务化应用的 L 波段探空系统高空风改进算法[J]. 沙漠与绿洲气
478 象,11(1):22-27.Lei Chen,Jianchun Bian,Yi Liu,et al. 2017.An Improved Upper-air Wind Measurement Algorithm
479 for L-band Radiosonde Sounding System [J]. Desert and Oasis Meteorology, 11(1):22-27.
480 刘寅.2014.FY-3A 气象卫星臭氧总量数据的质量控制方案及其在台风 Tembin(2012)和 Isaac(2012)中的应用[J].
481 大气科学,38(6):1066-1078. Liu Yin.2014.Quality Control of FY-3A Total Column Ozone and Its Application in
482 Typhoons Tembin(2012) and Isaac(2012)[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
483 38(6):1066-1078.
484 傅新姝,谈建国.2017.地基微波辐射计探测资料质量控制方法[J].应用气象学报,28(2):209-217.
485 Xinshu Fu,JianGuo Tan.2017.Quality control of temperature and humidity profile retrievals form ground-based
486 microwave radiometer[J].Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese),28(2):209-217.
487 Zou X, Zeng Z.2006.A quality control procedure for GPS radio occultation data [J].J.Geophys.Res., 111: D02112.
488 Scot M. Loehrer,Todd A. Edmands,James A. Moore.1996. TOGA COARE Upper-Air Sounding Data Archive:
489 Development and Quality Control Procedures[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 77(11):
490 2651-2672.
491 Houchi K ,Stoffelen A ,Marseille G J,et al.2014.Statistical Quality Control of High-Resolution Winds of Different
492 Radiosonde Types for Climatology Analysis[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 32(10):
493 1796-1812.
494 李柏,李伟.2011.阳江第八届国际探空系统比对试验综述[J].气象科技进展,1(3):6-13.
495 Ba Li,Wei Li.2011. A Review of Yangjiang 8th International Radiosonde Intercomparison[J].
496 Advances in Meteorological Science and Technology, 1(3):6-13.
497 姚雯,马颖.2015.秒级探空数据随机误差评估[J]. 应用气象学报,26(5):600-609.
498 Wen Yao,Yin Ma.2015. Evaluation on the Random Error of Second Level Sounding Data[J]. Journal of Applied
499 Meteorological Science (in Chinese), 26(5):600-609.
500 马颖,姚雯,黄炳勋.2011.用初估场对比中芬探空仪温度和位势高度记录[J]. 应用气象学报, 22(3):336-345. Yin
501 Ma, Wen Yao and BinXun Huang.2011. Comparison of Temperature and Geopotential Height Records Between
502 L-band and RS90/92 Radiosonde Systems Using First-guess Field [J]. Journal of Applied Meteorological Science
503 (in Chinese), 22(3):336-345.
504 刘永柱,龚建东,张林,等. 2019. 线性化物理过程对GRAPES 4DVAR同化的影响[J].气象学报, 77(2):196-209.
505 Liu Yongzhu, Gong Jiandong, Zhang Lin,et al. 2019. Influence of linearized physical processes on the GRAPES
506 4DVAR[J]. Acta Meteorologica Sinica, 77(2): 196-209.

- 507 李伟,郭启云,赵培涛.2010.L 波段电子探空仪测量结果不确定度分析[C].中国科学技术协会年会.
- 508 Wei Li,Qiyun Guo,Peitao Zhao.2010. The Measurement Data Uncertainty Analysis for L Band Electronic
- 509 Rawinsonde[C]. Annual meeting of China Association of science and technology.
- 510 王金成,龚建东,赵滨. 2015. 一种新的COSMIC大气折射率资料观测误差估计方法及在GRAPES全球三维变
- 511 分同化中的应用[J]. 气象学报, 73(1):142-158. Wang Jincheng, Gong Jiandong, Zhao Bin. 2015. A new method
- 512 for estimating observation error of the COSMIC refractivity data and its impacts on GRAPES-GFS model weather
- 513 forecasts[J]. Acta Meteorologica Sinica, 73(1): 142-158.
- 514 Ingleby B.2017. An assessment of different radiosonde types 2015/2016[R]. ECMWF Technical Memorandum
- 515 NO.807.

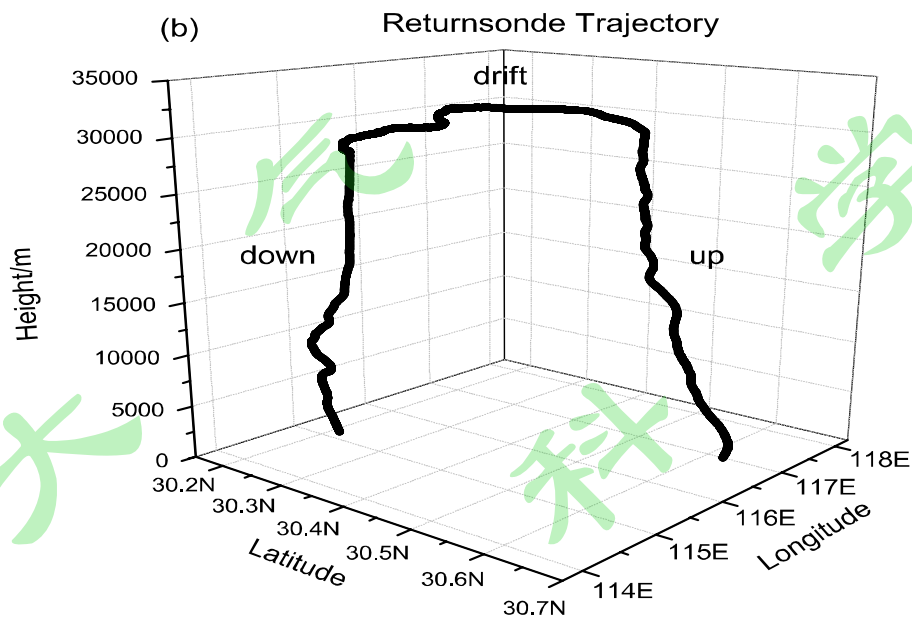
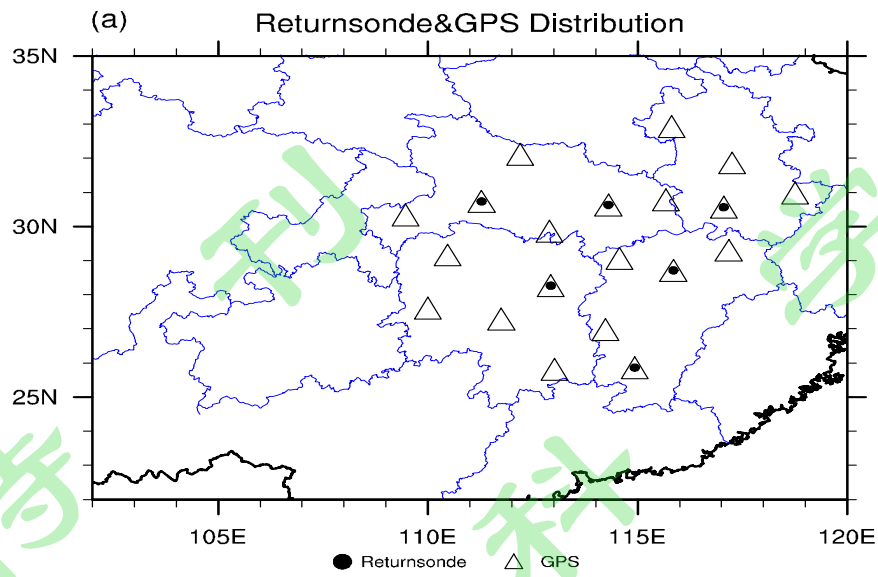


图1 往返探空试验区 (a) 及观测轨迹示意图 (b)

(图 a 中实心黑点代表往返探空气球施放站点、空心三角代表 GPS 接收机布设点)

Fig.1 Return radiosonde network distribution (a) and an example of observation trajectory (b)

(Black dots represent return radiosonde launch stations and triangles represent GPS receiver locations in Fig.1a)

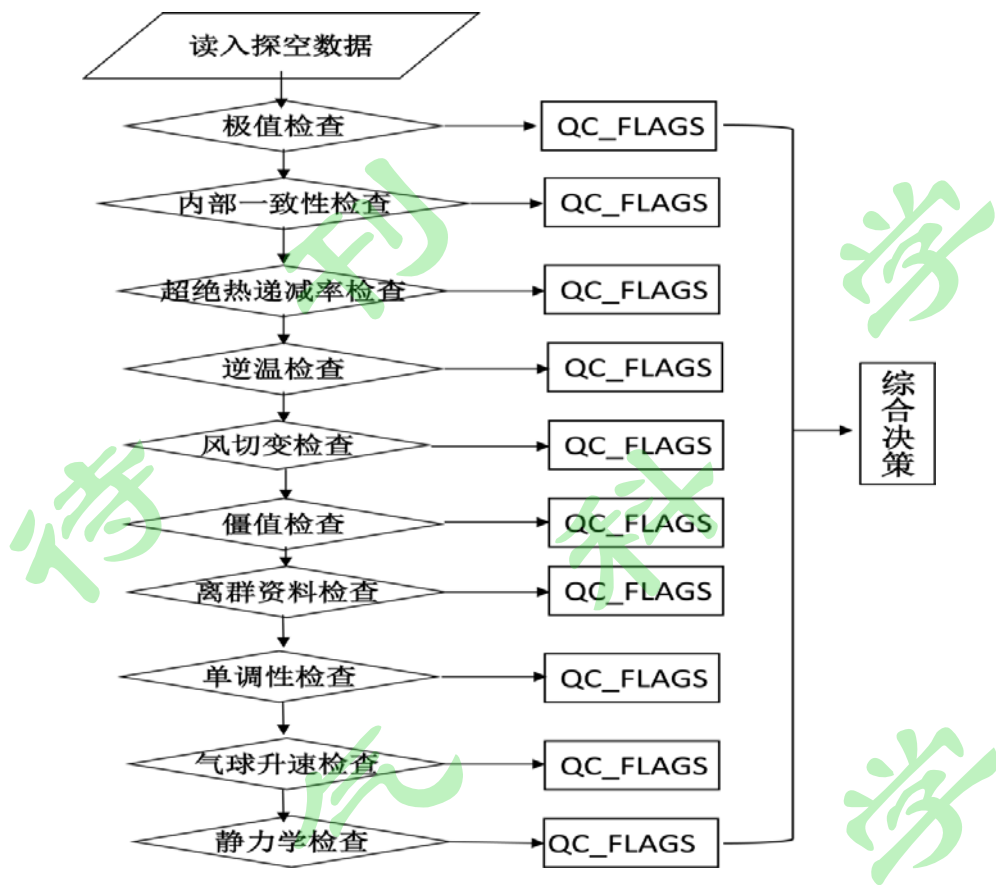


图2 往返探空质量控制流程图
Fig.2 Quality control flow of return radiosonde

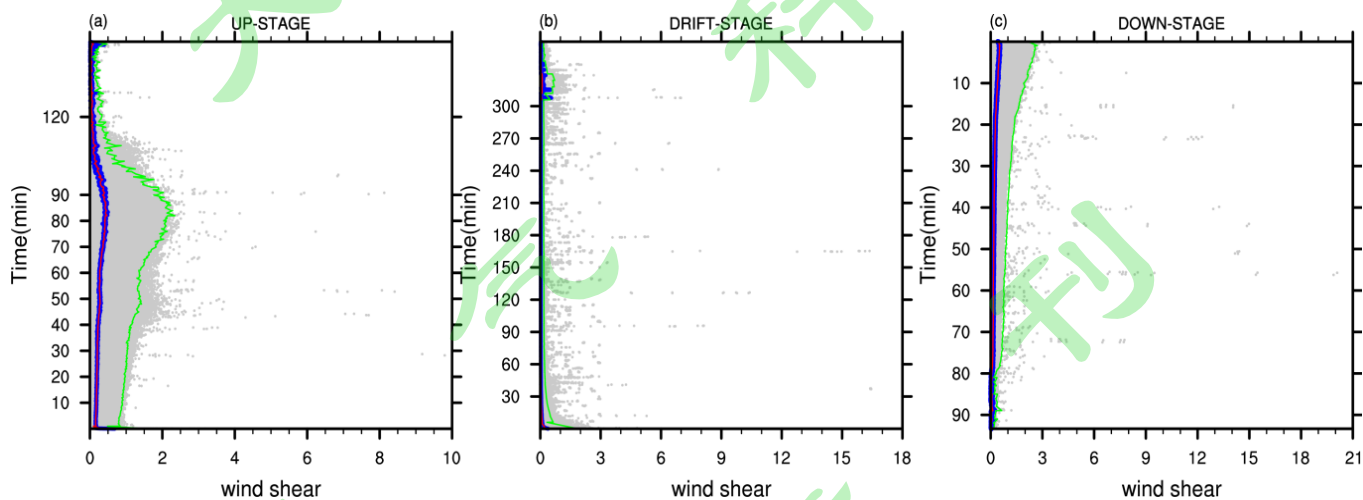


图3 往返探空上升段 (a)、平漂段 (b)、下降段 (c) 风切变阈值的垂直分布
(蓝色线为标准差均值廓线, 红色线为最小二乘法拟合廓线, 绿色线为 WS 判断阈值)

Fig.3 Vertical distribution of wind shear threshold in ascending stage (a), drifting stage (b) and descending stage(c) of return radiosonde

(Blue line represent mean profile of standard deviation, red line represent the least square fitting profile and green line represent wind shear threshold)

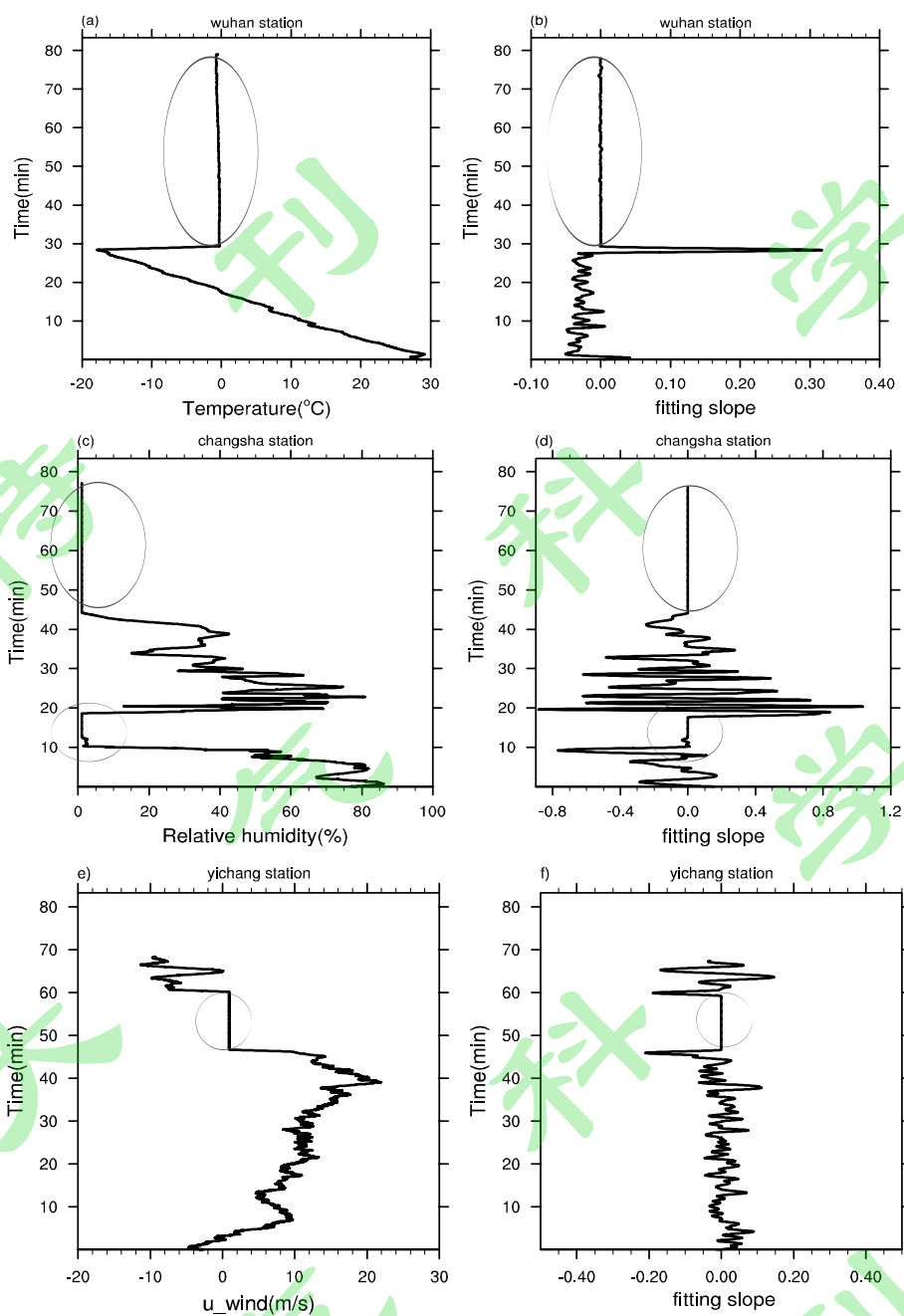


图4 僵值廓线的温度 (a)、湿度 (c)、纬向风 (e) 及对应拟合斜率 (b、d、f) 的垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of temperature (a), relative humidity(c), zonal wind (e) and corresponding fitting slope (b,d,f) in example of rigid profile

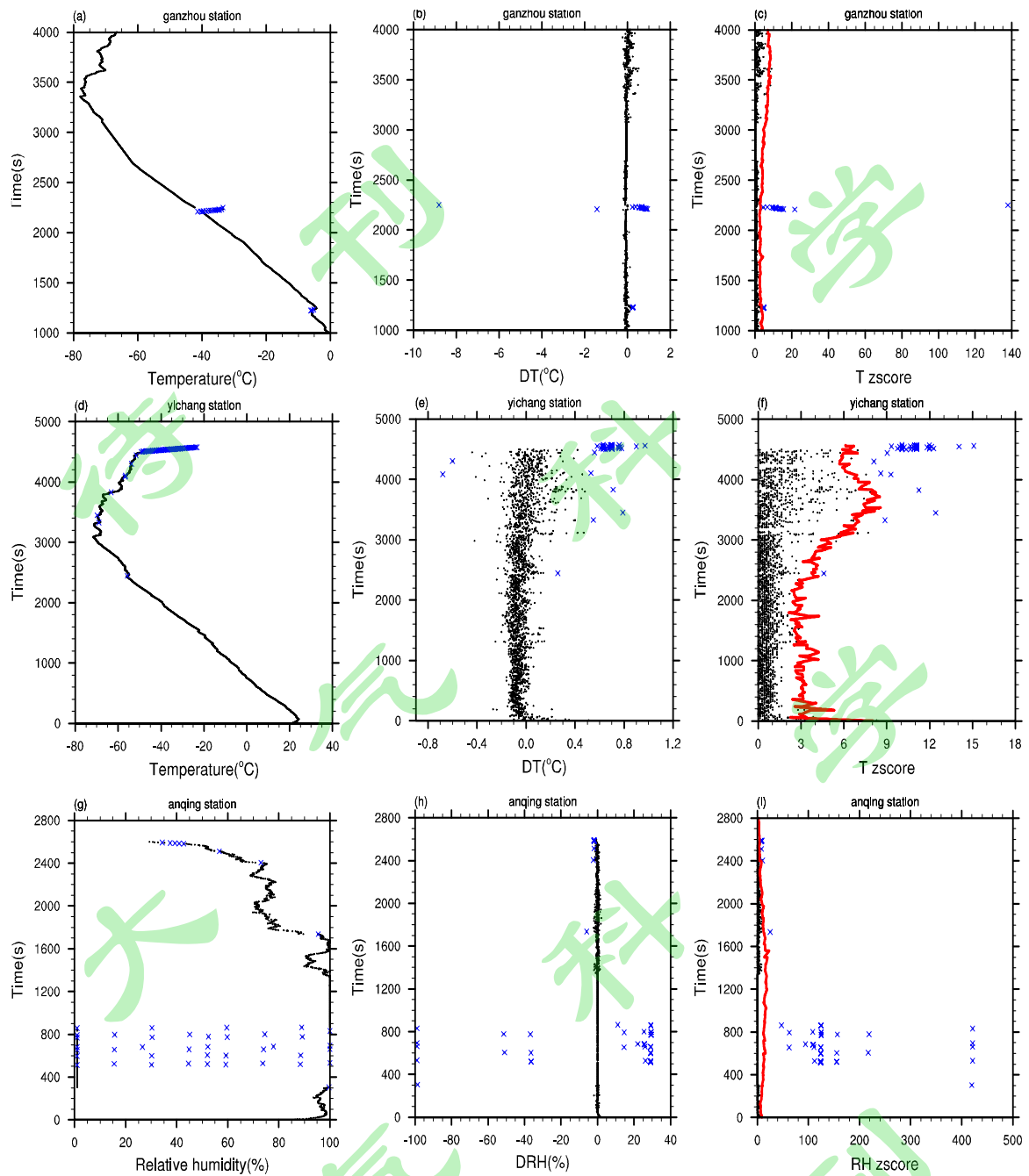


图5 不一致性廓线的探测值（左列）、对应时间变率信息（中列）及 Z-score 值（右列）的垂直分布
（图中蓝色×点代表可疑观测，红色实线代表 Z-score 阈值）

Fig.5 Vertical distribution of observed value (left column), corresponding time-variance information (middle column) and Z-score value (right column) in example of inconsistency profiles
(blue × represent suspicious observations ,red lines mean threshold of Z-score)

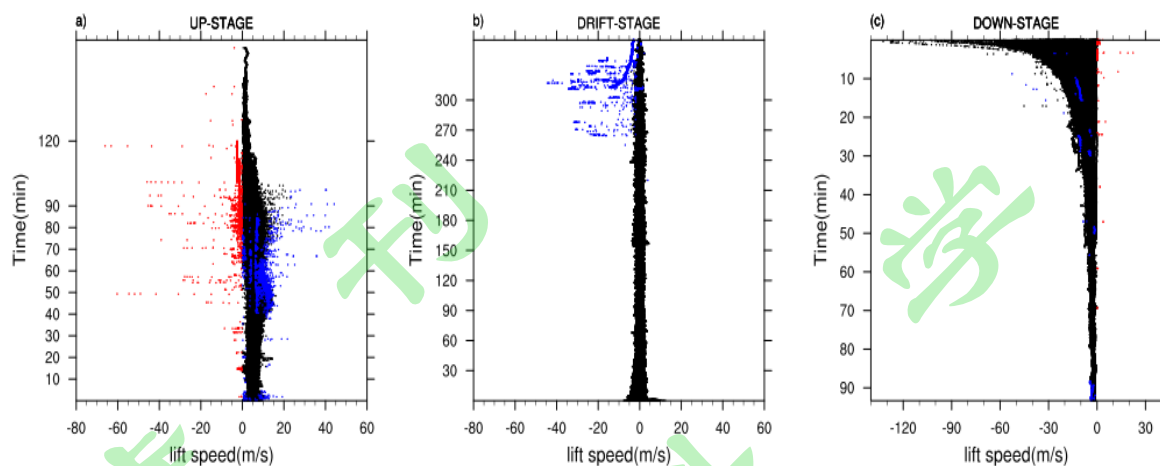


图6 探空气球上升速度的垂直分布
(a) 上升段, (b) 平漂段, (c) 下降段
(图中红色点代表错误观测, 蓝色点代表可疑观测)

Fig.6 Vertical distribution of lift speed in ascending stage (a), drifting stage (b) and descending stage(c) of return radiosonde
(red dots represent error observation, blue dots represent suspicious observations)

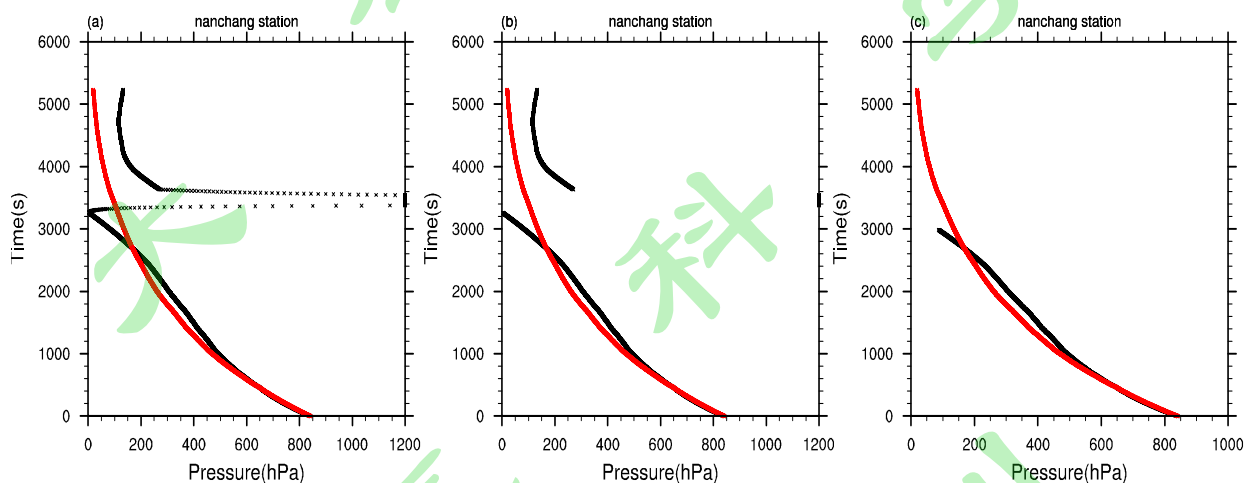


图7 气压异常廓线的原始观测 (a)、经过气压离群值检查后观测 (b) 及
增加静力学检查后观测 (c) 的垂直分布
(图中黑色代表气压观测值, 红色代表反算气压值)

Fig.7 Vertical distribution of raw pressure observation (a), pressure observation after outlier check (b) and pressure observation after hydrostatic check (c) in example of pressure abnormal profile
(black line represent raw pressure observation, red line represent inverse calculated pressure value)

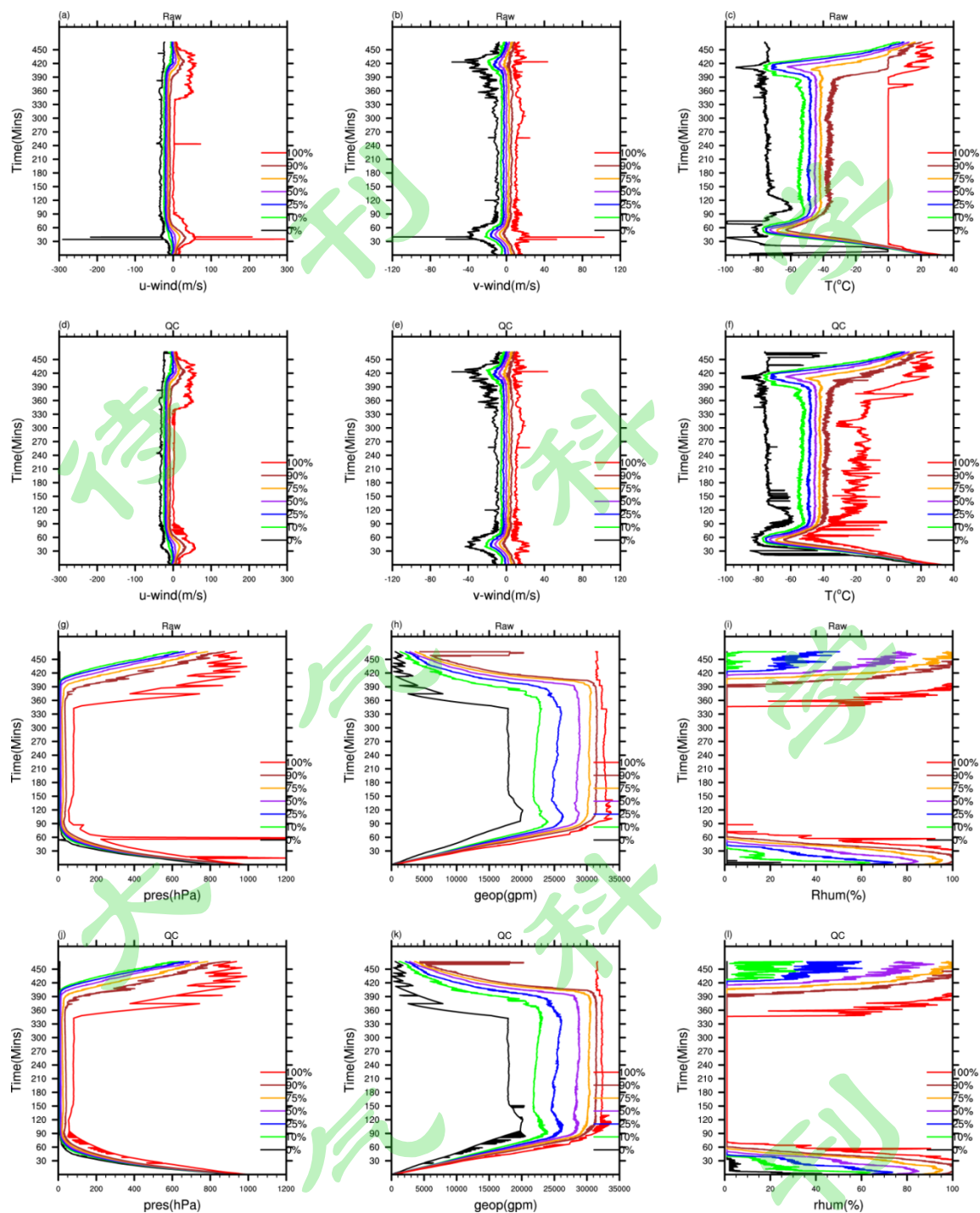


图 8 往返探空质量控制前和质量控制后的温度、湿度、气压、水平风和位势高度探测的不同百分位廓线分布图

(图中第一行和第三行是原始观测、第二行和第四行是质量控制后观测)

Fig.8 Percentile profiles of temperature, relative humidity, pressure, wind and geo-potential height of return radiosonde

(first line and third line represent raw data, second line and fourth line represent data after quality control)

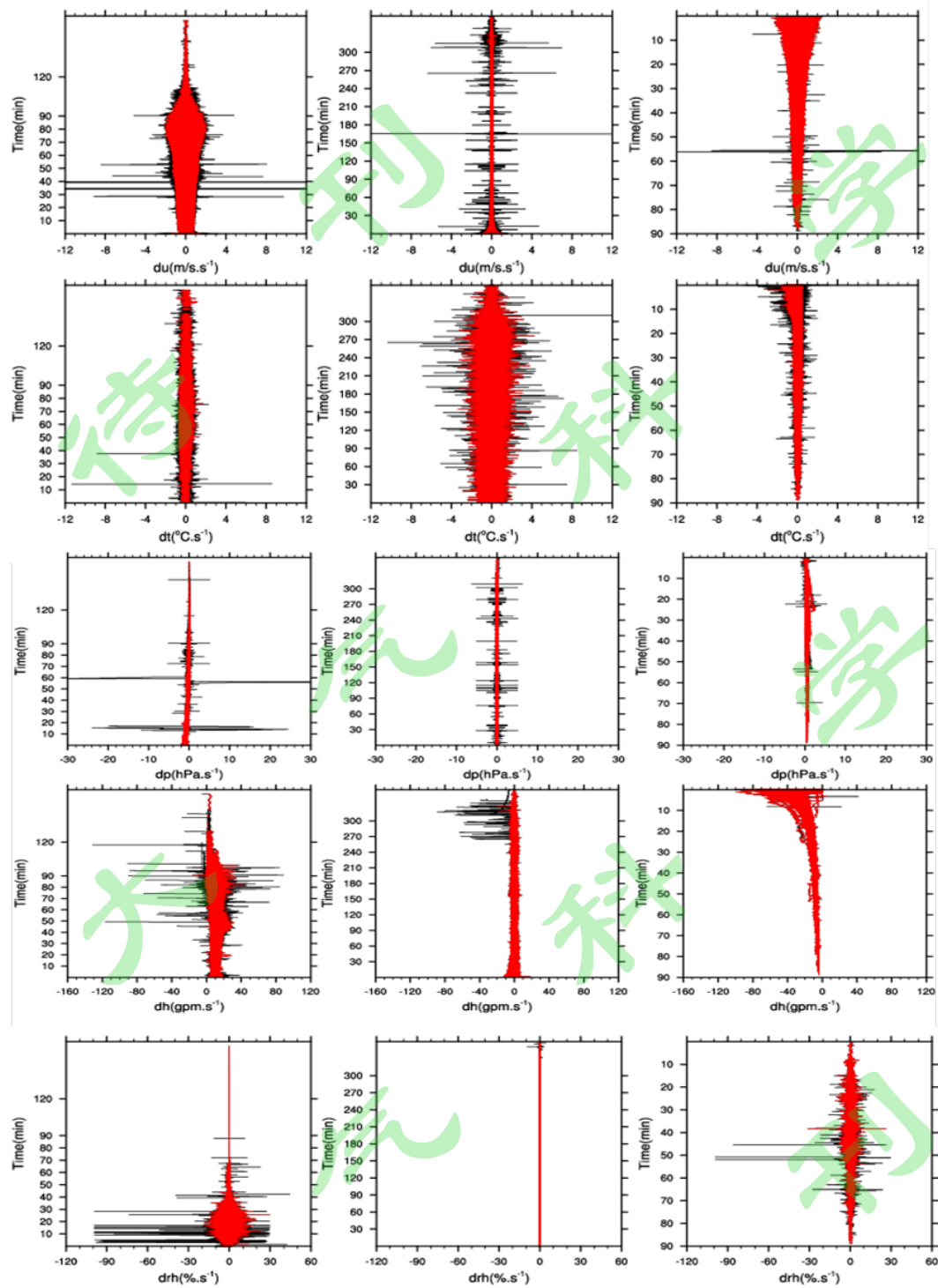


图9 往返探空质量控制前和质量控制后的纬向风、温度、气压、位势高度和湿度探测的时间变率分布图
(图中左列是上升段观测、中间列是平漂段观测、右列是下降段观测；
黑色代表质量控制前，红色代表质量控制后)

Fig.9 Time-variance distribution of zonal wind, temperature, pressure, geo-potential height and relative humidity of return radiosonde before(black line) and after quality control(red line)
(left column represent ascending stage, middle column represent drifting stage,
right column represent descending stage)

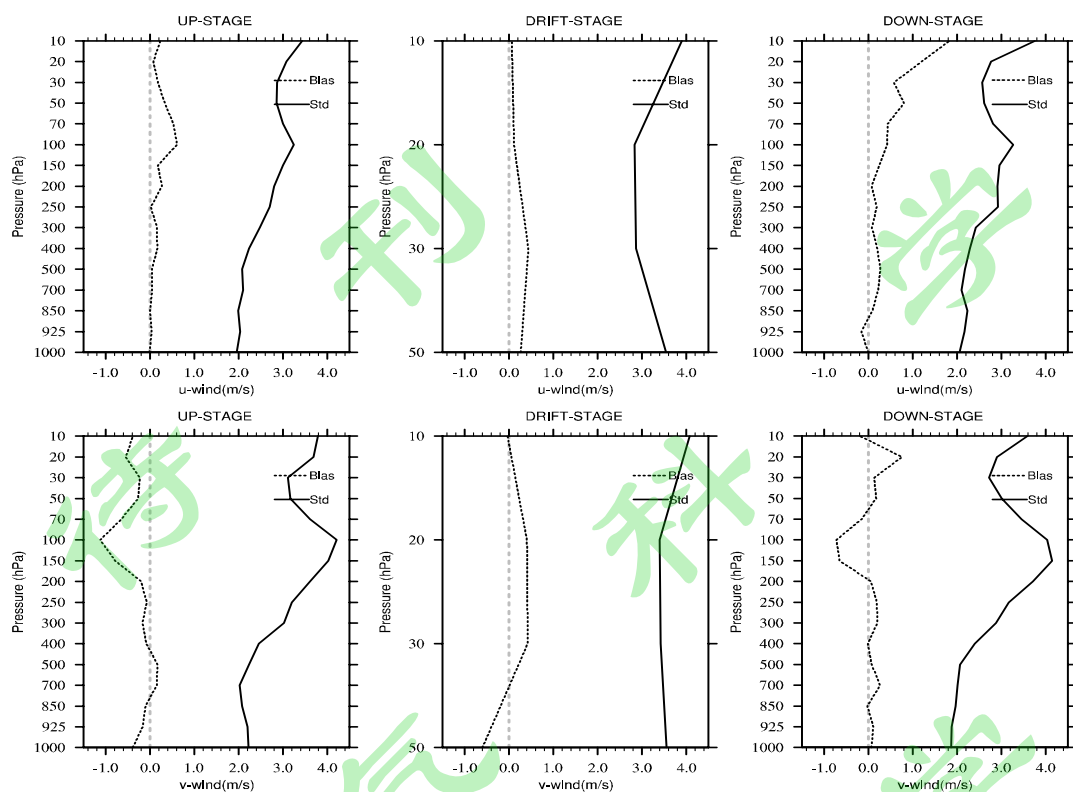


图 10 往返探空水平风测量相对于模式背景场的标准差和偏差的垂直分布
Fig.10 Vertical distribution of STD and BIAS of return radiosonde wind observation
against GRAPES model background

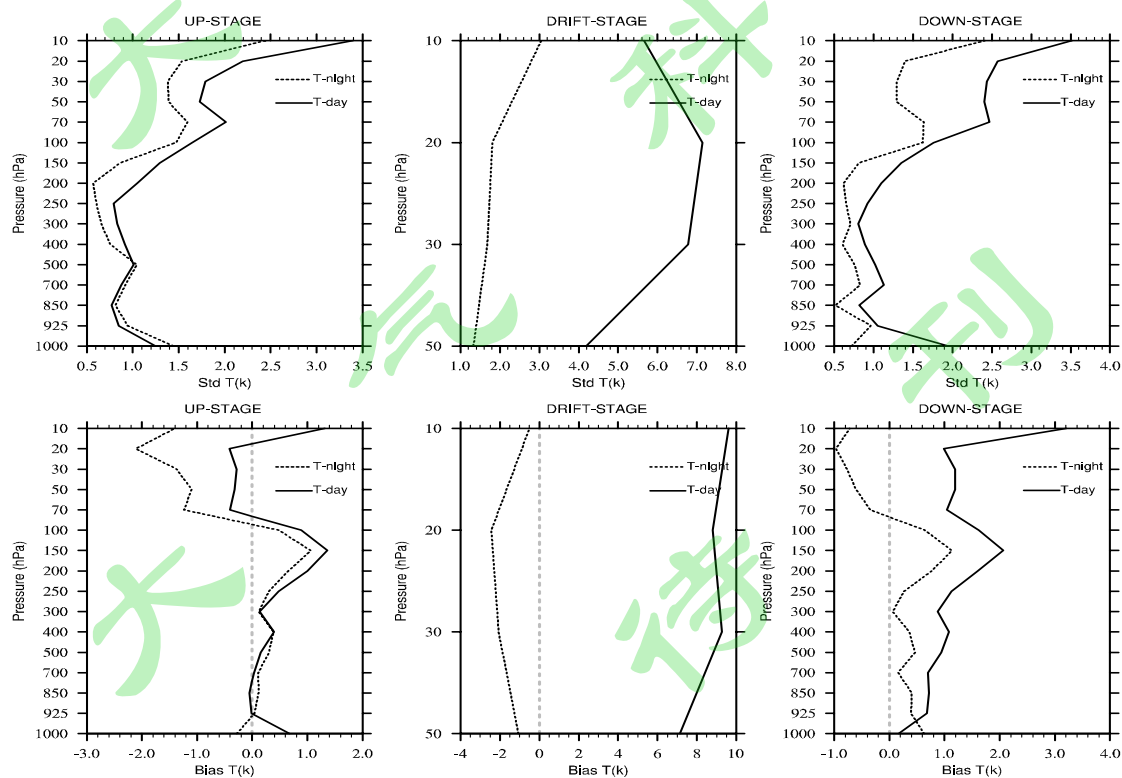


图 11 往返探空温度测量相对于模式背景场的标准差和偏差的垂直分布

Fig.11 Vertical distribution of STD and BIAS of return radiosonde temperature observation
against GRAPES model background

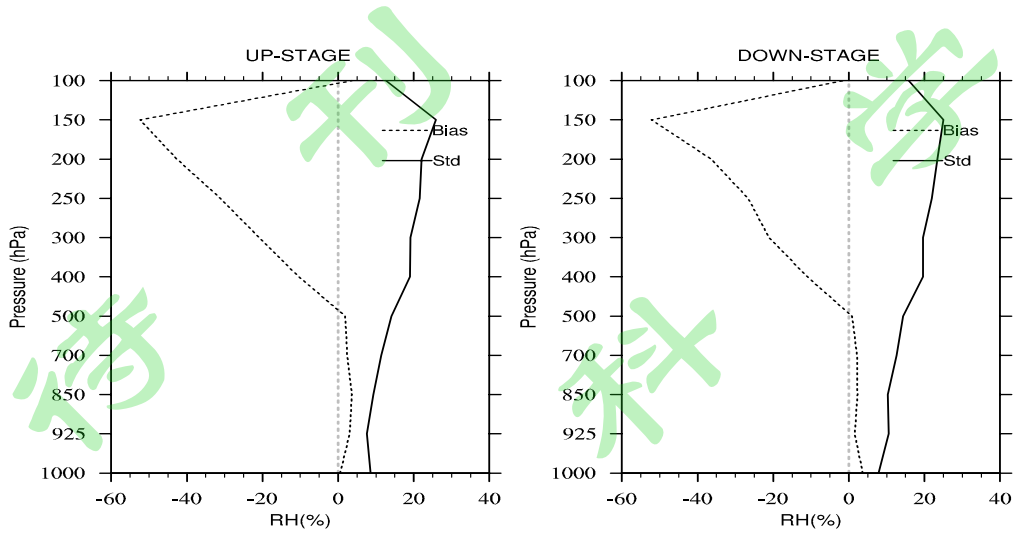


图 12 往返探空湿度测量相对于模式背景场的标准差和偏差的垂直分布

Fig.12 Vertical distribution of STD and BIAS of return radiosonde relative humidity observation
against GRAPES model background

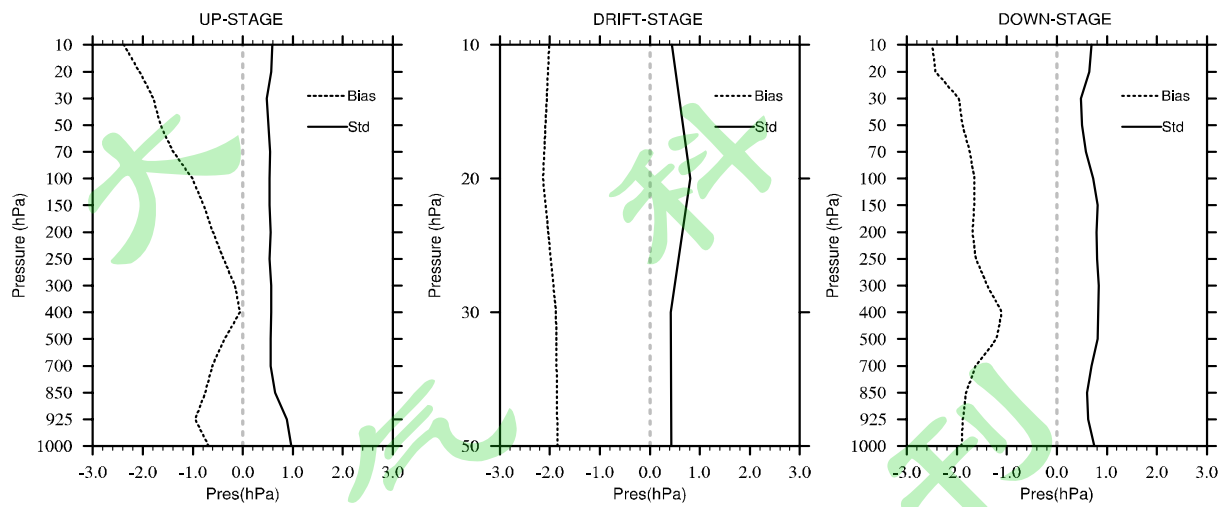


图 13 往返探空气压测量相对于模式背景场的标准差和偏差的垂直分布

Fig.13 Vertical distribution of STD and BIAS of return radiosonde pressure observation
against GRAPES model background

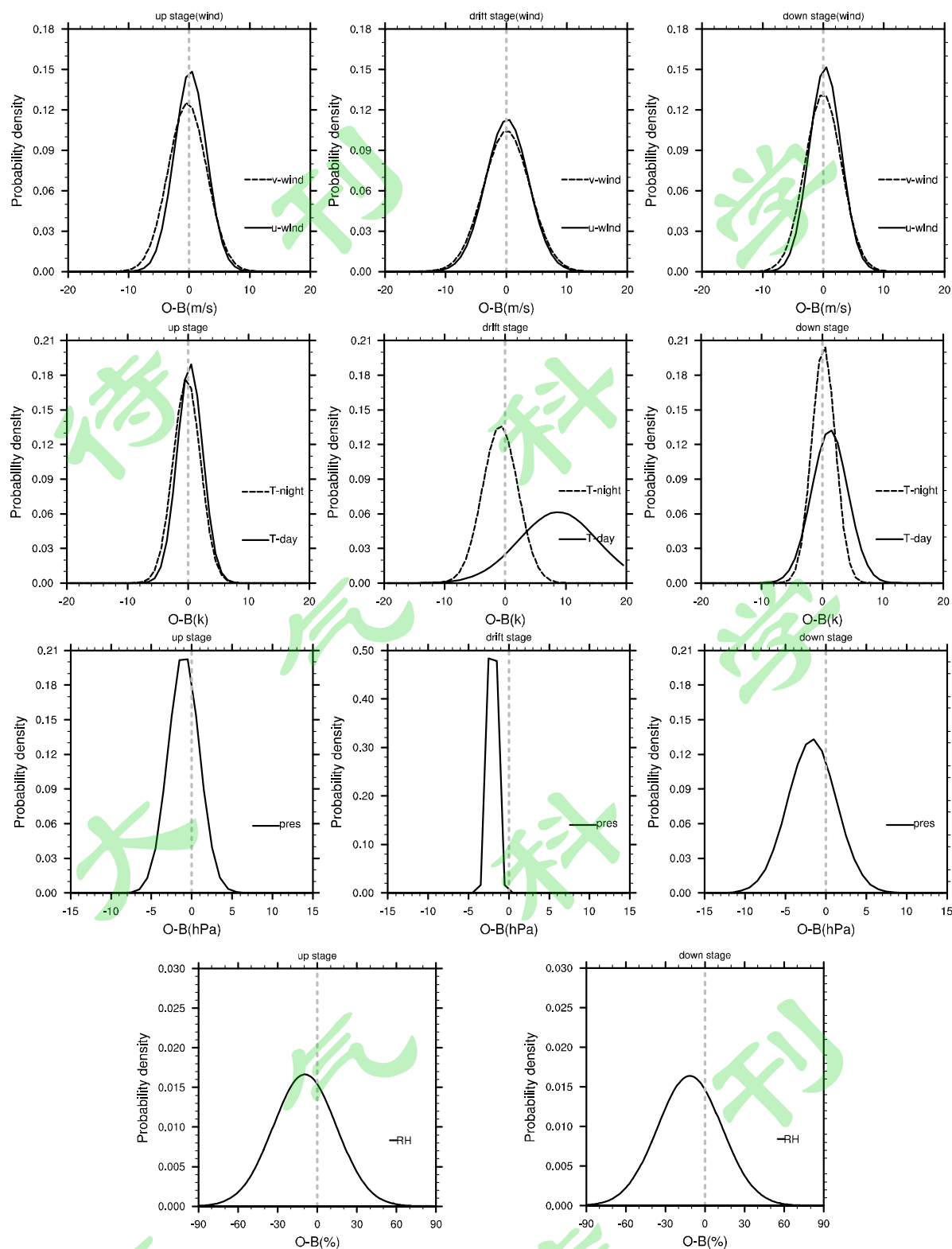


图 14 往返探空与模式背景场差值的概率密度分布

Fig.14 Probability density distribution (PDF) of differences between return radiosonde and GRAPES model background